

学位論文審査結果の概要

氏 名	川辺 知人
学位論文審査委員氏名	主査 佐川 貢一
	副査 中村 雅之
	副査 鳥飼 宏之
	副査 岡 和彦
	副査 藤崎 和弘
	副査 竹囲 年延
論 文 題 目	ホイールローダによる堆積物運搬作業の自動化と実証実験 (Demonstration experiment of automated gravel pile transportation work using a wheel loader)
審査結果の概要（2,000 字以内）	
<p>自律施工では堆積物運搬作業は重要なタスクの 1 つである．その堆積物運搬作業の中でホイールローダは重要な役割を担っている．一方で，ホイールローダを使用した作業の自動化についてはあまり研究がなされていない．ホイールローダによる一連の堆積物運搬作業の自動化は，ICT を活用した自律施工において重要である．</p> <p>当学位申請論文は，実際のホイールローダを対象に，それを自動化するための後付け運転装置の開発とそれを用いた走行制御方法の開発，及び，それを用いた堆積物の運搬アルゴリズムに関する研究である．提案する手法について，シミュレーションや模型実験だけでなく，実機を用いた実証実験をとおして，提案手法の有効性を評価している点にも大きな貢献があると考える．</p> <p>堆積物運搬作業を自動化するためには，（１）ホイールローダのむだ時間を考慮した走行制御，（２）堆積物全体を運搬し終えるまでに生じる膨大な堆積物形状パターンから適切な掬い取りと積み下ろしの位置・姿勢を決定する作業計画が必要となる．</p> <p>（１）ホイールローダのむだ時間を考慮した走行制御については，重機は制御入力を与えてから重機が動き始めるまでにむだ時間が生じる．このむだ時間による制御性能の低下が問題となっている．また，後付け運転装置の応答速度，地面の粘度，地面形状の分布などが走行制御モデルのパラメータに影響を与える．これら要因を考慮するとホイールローダの制御モデルはパラメータが非常に多くなり，複雑化することで外乱に対するロバスト性が低下するという問題がある．それについて，第 2 章で新たにホイールとステアリングに対してそれぞれ 1 入力 1 出力の単純な制御モデルによるシステム同定方法と，むだ時間と地面摩擦などといった制御時の外乱を考慮した制御手法を提案した．また，実際のホイールローダを用いた経路追従制御実験によりその有用性を示した．</p> <p>（２）堆積物全体を運搬し終えるまでに生じる膨大な堆積物形状パターンから適切な掬い取りと積み下ろしの位置・姿勢を決定する作業計画については，作業終了までにかかる総走行距離を小さくすることで，この作業の効率化を図る．そのためには，掘削により堆積物の形状が変化していくことも</p>	

考慮した最適経路計画が必要である。しかしながら、掘り取りの位置と姿勢、積み下ろしの位置と姿勢の6次元に加えて、その6次元の探索空間が時間と共に変化すること、そして、その作業の時間の総和が評価関数になっていることを考えると、その最適経路の探索には現実的ではない大きな時間が必要となる。また、現実の堆積物の変化を完全に予測した上で、最適経路を探索するのは現実的には実現が難しい。これらの問題に対処するために、この経路計画問題を3つの問題として分割し構造化した。その上で、深層強化学習により堆積物形状や車両位置から掘り取り候補点を評価することで、作業区画内に存在する全堆積物運搬作業にかかる総走行距離を小さくするための適切な経路計画を行う手法を第3章で新たに提案した。

第4章では、後付け運転装置を搭載したホイールローダを用いて複数の異なる屋外環境にて堆積物運搬の実証実験を行うことにより、(1)、(2)に提案した2つの手法が有効であることを示した。それらの実験環境では、その堆積物の大きさや形状、走行可能な領域、そして、地面の状態が同じでない場合においても提案手法による制御方法により堆積物運搬作業を実現した。

以上のように、本論文はホイールローダによる屋外作業の自動化に大きな貢献をしたものであり、その研究レベルは十分に高く、社会の発展に大きく寄与するものであると認められる。

よって、本論文は博士（工学）の学位を与えるに値すると認め、合格とする。

#### 学位論文の基礎となる参考論文

1. **T. Kawabe**, T. Takei, and E. Imanishi, “Path planning to expedite the complete transfer of distributed gravel piles with an automated wheel loader”, *Advanced Robotics*, Vol.35, Issue 23, pp.1418-1437, 2021.
2. **T. Kawabe**, M. Inagawa, T. Takei, H. Murayama, K. Yoshizawa, M. Ishibashi, and K. Nagatani, “Demonstration of autonomous driving control for a retrofitted wheel loader”, *J. Robot. Mechatron.*, Vol.36, No.1, pp. 211-228, 2024.
3. H. Murayama, **T. Kawabe**, M. Inagawa, K. Yoshizawa, M. Ishibashi, T. Takei, and K. Nagatani, “Demonstration of Snow Removal Work by Wheel Loader in an Environment Surrounded by Obstacles”, *J. Robot. Mechatron.*, Vol.35, No.5, pp.1251-1266, 2023.